

СТАЛЬНОЙ КАНАТ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ К-6 (1+5)

В.А. МУСИХИН

ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Современное промышленное строительство базируется преимущественно на использовании сборных железобетонных конструкций (ЖБК), изготовленных на заводах строительной индустрии. Детерминирующими тенденциями развития сборного железобетона являются применение высокоэффективных видов арматуры и использование высокопрочных бетонов. Наиболее эффективным видом арматуры для большепролётных предварительно напряжённых (ПН) ЖБК являются стальные арматурные канаты [1].

Стальной канат представляет собой гибкую композитную конструкцию с продольной винтовой анизотропией свойств, образованную свивкой проволок. Существующие в настоящее время строительные нормативные документы, как в нашей стране, так и за рубежом [2-10] (табл. 1) определяют величину напряжения в канате как в изотропном (монокристаллическом) стержне, не учитывая его составную конструкцию.

В табл. 1 приведены результаты сопоставимых подсчётов максимально допустимой величины предварительного напряжения σ_{sp} в проволоках стального каната на основе рекомендаций и формул различных нормативных документов. Временное сопротивление проволок каната σ_u (ultimate – предельный) – это напряжение при разрыве стального каната в свитом состоянии, то есть фактическая (агрегатная) прочность каната.

Таблица 1

Величина предварительного напряжения в стальном канате

Наименование нормативного документа	Уровень σ_{sp} к временному сопротивлению каната σ_u
СП 52-102-2004 Предварительно напряжённые железобетонные конструкции [2]	$\sigma_{sp} \leq 0,64 \sigma_u$
СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции [3]	$\sigma_{sp} \leq 0,762 \sigma_u$
СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы [4]	$\sigma_{sp} \leq 0,598 \sigma_u$
Евростандарт [5]	$\sigma_{sp} \leq 0,86 \sigma_u$
Рекомендации по расчёту прочности стальных канатов, применяемых в строительных металлических конструкциях [6]	$\sigma_{sp} \leq (0,42 \dots 0,70) \sigma_u$
Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений [7]	$\sigma_{sp} \leq (0,43 \dots 0,86) \sigma_u$
Инструкция по проектированию предварительно напряжённых стальных конструкций [8]	$\sigma_{sp} \leq 0,65 \sigma_u$
Рекомендации по применению 19-проволочных арматурных канатов в преднапряжённых железобетонных конструкциях [9]	$\sigma_{sp} \leq 0,76 \sigma_u$
ВСН 71-70 Технические указания по применению стальных канатов в предварительно напряжённых железобетонных конструкциях мостов [10]	$\sigma_{sp} \leq 0,64 \sigma_u$

Рекомендации и формулы этих нормативных документов установлены на основе большого объёма эмпирических данных о работе стальных канатов в различных условиях. Согласно этим рекомендациям максимальный уровень преднапряжения σ_{sp} в стальном канате изменяется в широких пределах: от 0,42 до 0,86 временного сопротивления каната σ_u .

Действующими строительными нормами проектирования [2-10] учитывается только осевое растяжение в элементах каната. Но в реальности при осевом растяжении каната в его проволоках возникает сложное напряжённо-деформированное состояние (НДС). Сердечник (центральная проволока каната) испытывает осевое растяжение, а повивочная проволока испытывает осевое растяжение и изгиб.

Также существует конструктивная неоднородность проволок каната, которая является следствием его композитной конструкции. Сердечник каната имеет меньшую длину, чем повивочная проволока и, следовательно, не может деформироваться наравне с ней. В результате происходит неравномерное распределение растягивающего усилия на проволоки каната. Сердечник является самой нагруженной проволокой каната.

По этим причинам при растяжении каната до предельного теоретического напряжения в нём часто обрывается одна из проволок, обычно сердечник, и весь канат становится непригодным к эксплуатации. При операции предварительного напряжения арматуры единствен-

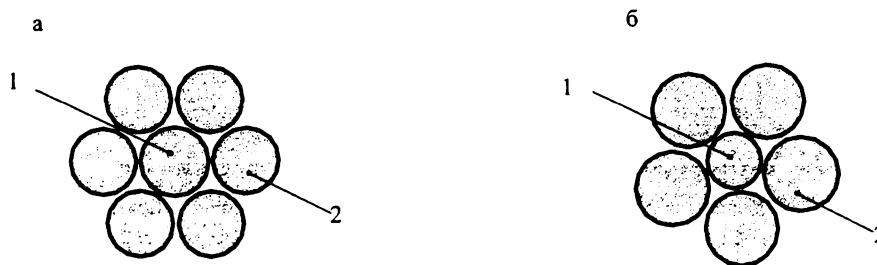


Рис. 1. Поперечные сечения стальных канатов класса: а – К-7 (1+6); б – К-6 (1+5); 1 – центральная прямолинейная проволока (сердечник), 2 – повивочная проволока

ным контролируемым параметром является усилие предварительного растяжения. Оператор задаёт усилие натяжения на гидродомкрате. Реальная картина НДС и существующее распределение усилий в разнородных элементах каната не учитываются.

В настоящее время стальной канат класса К-7 (1+6) (рис. 1а), изготавливаемый согласно ГОСТ 13840-68 [11], является наиболее распространённым типом высокопрочной витой проволоочной арматуры, применяемой при изготовлении большепролётных ПН ЖБК, как в нашей стране, так и за рубежом. Из всех существующих конструкций стальных спиральных канатов с линейным касанием проволок канат класса К-7 (1+6) является оптимальным канатом по критерию максимального использования прочностных свойств стали [12].

Диаметр сердечника каната класса К-7 (1+6) должен превышать диаметр повивочных проволок для обеспечения возможности изготовления каната. В работе основоположника применения канатной арматуры в России К.В. Михайлова [13] отмечается, что центральную проволоку стальной спиральной семипроволочной пряди с линейным касанием проволок необходимо принимать несколько большего диаметра, чем наружные проволоки, с целью:

- получения плотной свивки, при которой достигается плотное прилегание повивочных проволок как к центральной проволоке, так и друг к другу;
- обеспечения надёжного вовлечения центральной проволоки в общую работу пряди за счёт её радиального обжатия слоем спирально уложенных повивочных проволок, которые стремятся выпрямиться под воздействием растягивающего усилия.

Согласно К.В. Михайлову [13] диаметр центральной проволоки семипроволочной пряди должен превышать диаметр наружных повивочных проволок примерно на 10 %.

Основным государственным нормативным документом, регламентирующим геометрические характеристики составляющих проволок стального каната класса К-7 (1+6), является ГОСТ 13840-68 [11]. Согласно ГОСТ 13840-68 [11] диаметр центральной проволоки превышает диаметр повивочной проволоки на 1,61-4,00 %. Это требуемое расхождение диаметров составляющих проволок, значительно усложняющее технологию производства семипроволочного каната, объясняется производственной необходимостью. Проблема в том, что при одинаковом диаметре сердечника и повивочной проволоки в семипроволочном канате невозможно обеспечить плотную свивку проволок.

Как показала обработка эмпирических данных [14], в стальных канатах разница между длинами структурных элементов, составляющих канат, является основной причиной того, что фактическая прочность канатов всегда ниже теоретической на 5,0-22,5 % в зависимости от конструкции каната. Это явление получило название межструктурного сдвига.

Теоретическая прочность стального каната это суммарное разрывное усилие всех проволок в канате, при испытании их на растяжение каждой в отдельности, при этом проволоки испытываются до операции свивки в канат, то есть в так называемом «несвитом» состоянии. «Несвитое» состояние проволоки характеризуется отсутствием деформационных напряжений, возникающих в проволоке при операции свивки в канат. Фактическая (агрегатная) прочность стального каната это разрывное усилие каната в целом.

Согласно исследованию [14] при растяжении стальных канатов первыми теряют свою конструктивную целостность наиболее короткие проволоки, составляющие канат. Полные остаточные удлинения, то есть «шейки», в процессе растяжения каната появляются сначала именно в самых коротких проволоках каната. Основной вывод исследования [14]: в стальном

канате наиболее нагруженными элементами являются наиболее короткие элементы каната, а наименее нагруженными элементами являются наиболее длинные элементы каната.

Автором статьи проведены теоретические исследования проблемы влияния сложной составной конструкции стального каната на величину напряжений в элементах каната при его растяжении. На основании дифференциальных уравнений Кирхгофа для тонкого криволинейного стержня разработана обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок, которая позволяет определять сложное НДС элементов каната с учётом его геометрических характеристик (диаметр проволок, угол свивки повивочных проволок) и механических свойств стали (модули упругости и сдвига) [12].

Зная реальную картину НДС в элементах каната можно обоснованно определять величину эффективного предварительного напряжения стального каната. Уточнение методики назначения максимально допустимой величины преднапряжения в проволоках стального каната с учётом его композитной конструкции позволяет определять реально необходимое количество канатной арматуры. То есть можно добиться снижения расхода дорогостоящей высокопрочной арматурной стали в большепролётных ПН ЖБК и повышения безопасности производства работ в процессе изготовления ПН ЖБК.

Автором на основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си [15], которая определяет сложное НДС в проволоках каната К-7 (1+6) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната (канат растягивается осевой силой N_x , и при этом его концы закреплены от вращения).

Условный диаметр каната класса К-7 (1+6) равен 15,0 мм, номинальный диаметр равен 15,2 мм, диаметр сердечника равен 5,2 мм и диаметр повивочной проволоки равен 5,0 мм. Согласно [11] кратность свивки повивочных проволок этого каната может варьироваться в пределах от 12 до 16.

Таблица 2

Расчёт НДС каната К-7 (1+6) при различной кратности свивки

Канат	k, [ед]	Слой проволок	min d ₀ , мм	ΔL _{ис} , мм	Напряжения, МПа					Δp, %	СП [2]	Δс, %
					Посчитанные по программе							
					σ _n	σ _m	τ _t	σ _r	σ _{экв}		σ _r = σ _n	
К-7 (1+6) 15,2 мм	12	0	5,144	2,79	1420,0			1420,0		1,60	1366,5	3,9
		1			1377,5	20,2	1,2	1397,7	1397,7			
	13	0	5,133	2,58	1412,1			1412,1		1,36	1366,5	3,3
		1			1375,9	17,3	0,9	1393,2	1393,2			
	14	0	5,124	2,40	1405,8			1405,8		1,16	1366,5	2,9
		1			1374,6	14,9	0,8	1389,6	1389,6			
	15	0	5,116	2,24	1400,7			1400,7		1,02	1366,5	2,5
		1			1373,6	13,0	0,6	1386,6	1386,6			
	16	0	5,110	2,10	1396,6			1396,6		0,90	1366,5	2,2
		1			1372,8	11,5	0,5	1384,2	1384,2			

В таблице введены следующие обозначения: k – кратность свивки повивочных проволок; слой проволок: 0 – центральная проволока (сердечник), 1 – повивочная проволока; $\Delta L_{ис}$ – разница длин сердечника и повивочной проволоки на участке длины каната равном одному шагу свивки повивочных проволок; σ_n – нормальные напряжения от осевого растяжения; σ_m – нормальные напряжения от изгиба; τ_t – касательные напряжения от кручения; σ_r – максимальные нормальные напряжения; $\sigma_{экв}$ – эквивалентные напряжения в проволоке; Δp – расхождение вычисленных по программе напряжений в повивочной проволоке и сердечнике; $\Delta \varepsilon$ – расхождение напряжений в сердечнике, вычисленных по программе, и напряжений в канате, посчитанных согласно СП [2]. Внешняя осевая растягивающая сила N_x равна $1,9 \cdot 10^5$ Н.

В табл. 2 представлены результаты расчёта неравномерности распределения напряжений между сердечником и повивочными проволоками стального каната К-7 (1+6) при различной кратности свивки повивочных проволок.

В табл. 2 величина $\min d_0$ представляет собой минимально допустимый диаметр сердечника каната, который определяется из условия плотного прилегания повивочных проволок к сердечнику и друг к другу, то есть из условия нормального контакта повивочных проволок с центральной проволокой и из условия собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками. Программа для ЭВМ [15] определяет минимально допусти-

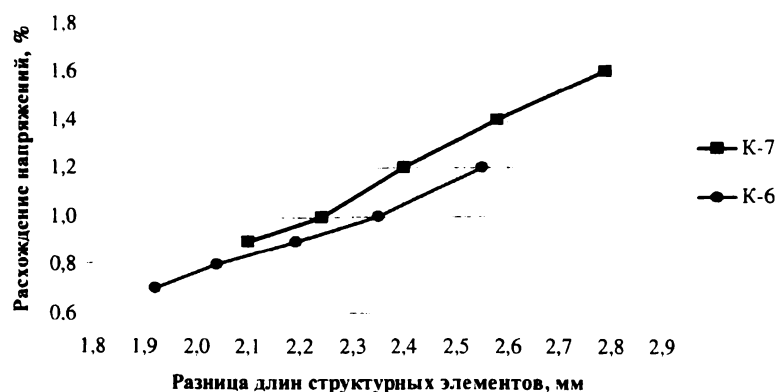


Рис. 2. График зависимости расхождения напряжений в структурных элементах канатов K-7 (1+6) и K-6 (1+5) от разницы длин этих элементов

мый диаметр сердечника каната K-7 (1+6) по заданным внешнему диаметру каната и кратности свивки повивочных проволок.

На рис. 2 представлен график зависимости расхождения напряжений в структурных элементах каната K-7 (1+6) от разницы длин этих элементов. Из графика на рис. 2 видно, что по мере увеличения разницы длин сердечника и

повивочной проволоки расхождение напряжений в сердечнике и повивочной проволоке каната K-7 также увеличивается. Таким образом, результаты теоретических исследований автора полностью совпадают с выводами работы [14], полученными на основе обработки многочисленных эмпирических данных. Следовательно, работа [14] подтверждает адекватность разработанной автором обобщённой математической модели стального спирального каната с линейным касанием проволок.

Как видно из произведённых автором теоретических исследований (табл. 2) и как показала обработка эмпирических данных [14], в стальных канатах разница между длинами структурных элементов, составляющих канат, то есть разница между длинами различных проволок каната, является основной причиной неравномерности распределения напряжений между различными проволоками каната.

Рассматривая стальной канат класса K-7 (1+6), очевидно, что сердечник всегда является максимально нагруженной проволокой каната класса K-7 (1+6). Это явление объясняется существующим различием геометрических характеристик (длины и диаметра) сердечника и повивочной проволоки каната класса K-7 (1+6). В канате класса K-7 (1+6) сердечник (прямолинейная центральная проволока) всегда короче повивочной проволоки (спиральной наружной проволоки) и, следовательно, не может деформироваться наравне с ней.

Для уменьшения неравномерности распределения напряжений между различными проволоками стального каната необходимо уменьшить разницу длин различных проволок, составляющих канат.

Рассматривая прочностные характеристики стальных проволок, составляющих канат класса K-7 (1+6), необходимо учитывать, что при уменьшении диаметра стальной проволоки её прочностная характеристика увеличивается. Следует отметить, что в канате класса K-7 (1+6) максимальные напряжения возникают в центральной проволоке (сердечнике), которая имеет наибольший диаметр и, следовательно, наименьшую прочностную характеристику. Таким образом, прочность всего каната класса K-7 (1+6) определяется прочностью составляющей проволоки, имеющей наименьшую прочностную характеристику.

С одной стороны диаметр сердечника каната K-7 (1+6) должен несколько превосходить диаметр повивочной проволоки для обеспечения возможности изготовления каната. С другой стороны диаметр сердечника каната K-7 (1+6) желательно сделать меньше диаметра повивочной проволоки для того, чтобы в канате K-7 (1+6) максимально нагруженная (самая короткая) проволока имела бы наибольшую прочностную характеристику. Эта дилемма в конструкции каната класса K-7 (1+6) является неразрешимой.

Конструкция каната K-7 (1+6) несовершенна. Она содержит в себе неразрешимое внутреннее противоречие. Технологическое условие (возможность изготовления каната) вступает в противоречие с конструктивным условием (максимально использовать прочностные свойства материала в строительной конструкции).

Для уменьшения неравномерности распределения напряжений между различными проволоками стального каната и для устранения явления наличия максимальных напряжений в проволоке каната, имеющей наименьшую прочностную характеристику, необходимо принципиально изменить саму конструкцию стального спирального каната с линейным касанием проволок. То есть необходимо разработать оптимальную конструкцию стального спирального каната, предназначенного для использования в качестве напрягаемой арматуры ПН ЖБК. Детерминирующим критерием оптимизации для конструкции стального арматурного каната является максимальное использование прочностных свойств стальных проволок, составляющих канат.

Надо разработать такую конструкцию стального спирального каната с линейным касанием проволок, в которой выполнялись бы два условия оптимизации.

1-е условие оптимизации: разница длин различных проволок, составляющих стальной канат, должна быть минимальной.

2-е условие оптимизации: максимально нагруженная проволока стального каната должна иметь наибольшую прочностную характеристику.

Автором на основе дедуктивного метода научного анализа разработан новый стальной спиральный канат класса К-6 (1+5) с линейным касанием проволок (см. рис. 16). Канат К-6 (1+5) имеет теоретически обоснованную оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната. Стальной арматурный канат конструкции класса К-6 (1+5) не имеет аналогов в нашей стране и за рубежом.

На основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си, которая определяет сложное НДС в проволоках каната К-6 (1+5) при заданном внешнем растягивающем усилии. Эта программа аналогична программе для каната К-7 (1+6) [15].

Условный диаметр каната класса К-6 (1+5) равен 15,0 мм, номинальный диаметр равен 15,4 мм. диаметр сердечника равен 4,2 мм и диаметр повивочной проволоки равен 5,6 мм. Кратность свивки повивочных проволок этого каната принимаем в пределах от 12 до 16 по аналогии с канатом класса К-7 (1+6).

В табл. 3 представлены результаты расчёта неравномерности распределения напряжений между сердечником и повивочными проволоками стального каната К-6 (1+5) при различной кратности свивки повивочных проволок.

Таблица 3

Расчёт НДС каната К-6 при различной кратности свивки

Канат	k, [сд]	Слой проволок	min d ₀ , мм	ΔL _{ис} , мм	Напряжения, МПа					Δп, %	СП [2]	Δс. %
					Посчитанные по программе							
					σ _n	σ _m	τ _i	σ _i	σ _{экв}		σ _i = σ _n	
К-6 (1+5) 15, 4 мм	12	0	4,062	2,55	1438,8			1438,8		1,22	1386,8	3,7
		1			1399,9	21,6	1,2	1421,5	1421,5			
	13	0	4,053	2,35	1431,1			1431,1		1,01	1386,8	3,2
		1			1398,0	18,5	0,9	1416,5	1416,5			
	14	0	4,045	2,19	1425,0			1425,0		0,89	1386,8	2,8
		1			1396,5	15,9	0,8	1412,4	1412,4			
	15	0	4,039	2,04	1420,1			1420,1		0,77	1386,8	2,4
		1			1395,3	13,9	0,6	1409,2	1409,2			
	16	0	4,034	1,92	1416,0			1416,0		0,68	1386,8	2,1
		1			1394,3	12,2	0,5	1406,5	1406,5			

В табл. 3 все обозначения аналогичны обозначениям в табл. 2. Значение внешней осевой растягивающей силы N_x равно $1,9 \cdot 10^5$ Н.

На рис. 2 представлен график зависимости расхождения напряжений в структурных элементах каната К-6 (1+5) от разницы длин этих элементов.

Из вышеприведённых данных (табл. 2 и табл. 3) видно, что в канате класса К-6 (1+5) расхождение напряжений в сердечнике и повивочной проволоке, то есть $\Delta \sigma$, меньше, чем в канате класса К-7 (1+6), так как разница длин сердечника и повивочной проволоки в канате класса К-6 (1+5) меньше, чем в канате класса К-7 (1+6). Таким образом, «1 условие оптимизации» для стального каната класса К-6 (1+5) выполняется.

Рассматривая прочностные характеристики стальных проволок, составляющих канат класса К-6 (1+5), и зная, что при уменьшении диаметра стальной проволоки её прочностная характеристика увеличивается, можно видеть, что в канате класса К-6 (1+5) центральная проволока, в которой возникают максимальные напряжения, имеет наименьший диаметр и, следовательно, наибольшую прочностную характеристику. Таким образом, прочность всего каната класса К-6 (1+5) определяется прочностью составляющей проволоки, имеющей наибольшую прочностную характеристику. Следовательно, «2 условие оптимизации» для стального каната класса К-6 (1+5) также выполняется.

«Максимальное использование прочностных свойств стали» показано путём сравнения эпюр нормальных напряжений (σ_i) в структурных элементах стальных канатов класса К-7 (1+6) и класса К-6 (1+5) при их осевом растяжении и эпюр прочностных характеристик (R_s) этих элементов (рис. 3). На рис. 3 видно, что эпюра нормальных напряжений в структурных элементах каната К-7 (1+6) абсолютно не конгруэнтна эпюре прочностных характеристик этих элементов, а эпюра нормальных напряжений в структурных элементах каната К-6 (1+5) практически конгруэнтна эпюре прочностных характеристик этих элементов. Значит, прочностные свойства стальных проволок в канате класса К-6 (1+5) используются в большей степени, чем в канате класса К-7 (1+6).

В канате К-6 (1+5) практически выполняется сформулированный Р.Л. Бартини [16] принцип конгруэнтности, широко использовавшийся в авиастроении. Значит, в канате К-6 (1+5) достигается практически полное (сто процентное) использование прочностных свойств стальных проволок, то есть фактическая (агрегатная) прочность каната К-6 (1+5) приближается к теоретической прочности (суммарному разрывному усилию всех проволок каната).

Основной характеристикой коррозионной стойкости стального арматурного каната является коррозионная активность, обозначаемая КА. Это отношение суммарного периметра проволок каната к суммарной площади поперечного сечения проволок каната. В табл. 4 представлены результаты расчёта КА стальных канатов.

Чем выше коррозионная активность стального арматурного каната, тем сильнее он

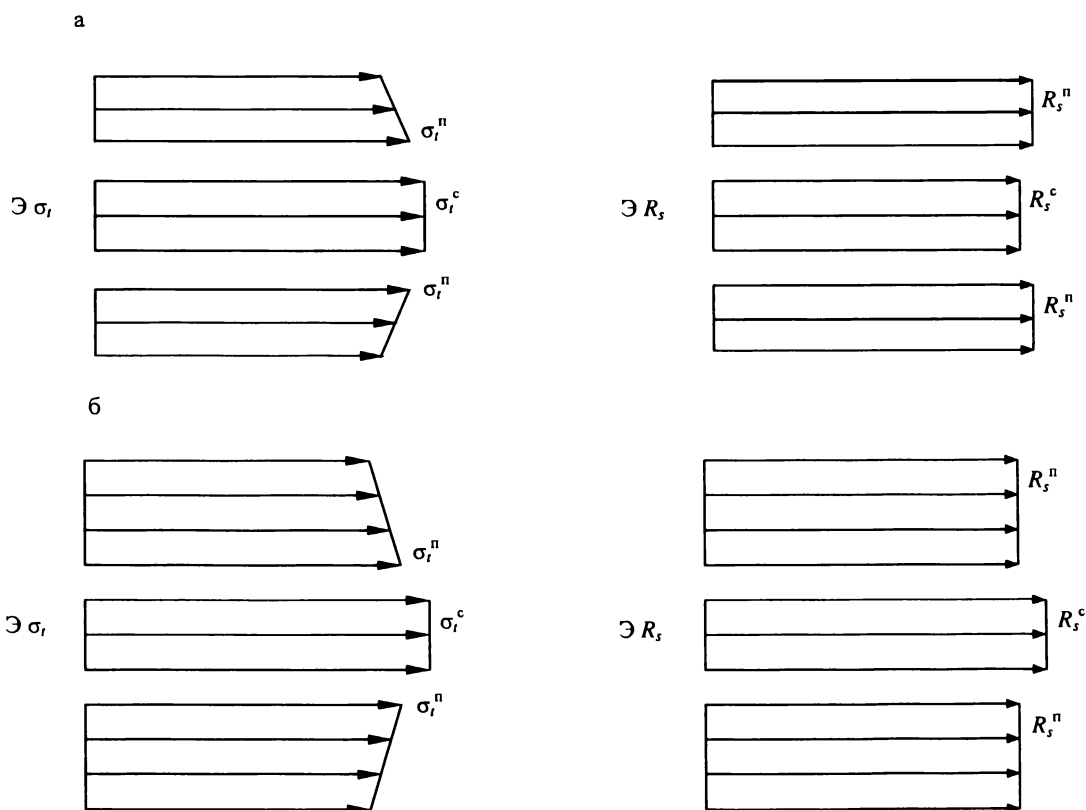


Рис. 3. Соотношение напряжений и прочностных характеристик в элементах канатов К-7 (1+6) и К-6 (1+5) (масштаб условный): а – К-7 (1+6); б – К-6 (1+5), п – повивочная проволока, с – сердечник

подвержен опасности возникновения коррозионного процесса. Из табл. 4 видно, что величина коррозионной активности каната К-6 (1+5) меньше, следовательно, в канате К-6 (1+5) вероятность возникновения процесса коррозии ниже, чем у каната К-7 (1+6).

Таблица 4

Конструктивные параметры стальных арматурных канатов

Класс каната	Нормы	D_{yc} , мм	D_n , мм	A_k , мм ²	d_c , мм	d_n , мм	K_A , мм ⁻¹
К-7 (1+6)	ГОСТ 13840-68 [11]	15,0	15,2	138,98	5,2	5,0	0,795
К-6 (1+5)	Автор статьи	15,0	15,4	136,94	4,2	5,6	0,738

В таблице приняты обозначения: D_{yc} – условный диаметр каната; D_n – номинальный диаметр каната; A_k – площадь поперечного сечения каната; d_c – номинальный диаметр центральной проволоки; d_n – номинальный диаметр повивочной проволоки; K_A – коррозионная активность стального каната.

Расхождение площадей сечений канатов класса К-6 (1+5) и класса К-7 (1+6) составляет 2,04 мм² или 1,47 % от площади сечения каната класса К-7 (1+6). Следовательно, можно сделать важный для существующих проектов ПН ЖБК вывод, что канат К-6 (1+5) номинальным диаметром 15,4 мм и канат К-7 (1+6) номинальным диаметром 15,2 мм взаимозаменяемы.

Использование в большепролётных ПН ЖБК стальных канатов класса К-6 (1+5) в качестве напрягаемой арматуры значительно повышает эффективность использования прочностных свойств дорогостоящей высокопрочной арматурной стали.

Библиографический список

1. Мусихин, В.А. Преимущества применения стальных арматурных канатов / В.А. Мусихин // Журнал «Челябинск. Архитектура. Строительство». – 2006. – № 4-5. – С. 38-40.
2. СП 52-102-2004 Предварительно напряжённые железобетонные конструкции / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 37 с.
3. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.
4. СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 200 с.
5. European Standard "Prestressing steels – Part 3: Strand", Ref. No. prEN 10138-3:1999 E, European Committee for Standardization, Brussels, 1999, 15 pp.
6. Рекомендации по расчёту прочности стальных канатов, применяемых в строительных металлических конструкциях – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1982. – 25 с.
7. Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений – НИИ строительных конструкций Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1978. – 94 с.
8. Инструкция по проектированию предварительно напряжённых стальных конструкций – АСИА СССР, ЦНИИСК – М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 72 с.
9. Рекомендации по применению 19-проволочных арматурных канатов в преднапряжённых железобетонных конструкциях – М.: НИИЖБ, 1984. – 9 с.
10. ВСН 71-70 Технические указания по применению стальных канатов в предварительно напряжённых железобетонных конструкциях мостов – М.: Оргтрансстрой, 1970. – 24 с.
11. ГОСТ 13840-68 Канаты стальные арматурные 1х7. Технические условия. – М.: Стандартиздат, 1995. – 8 с.
12. Мусихин, В.А. Расчёт и конструирование стальных спиральных канатов, используемых в качестве предварительно напряжённой арматуры железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Мусихин. – Челябинск, 2003. – 206 с.
13. Михайлов, К.В. Проволочная арматура для предварительно напряжённого железобетона / К.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1964. – 190 с.
14. Гурьянов, Ю.А. Влияние межструктурного сдвига на прочность стальных канатов / Ю.А. Гурьянов // Сталь. – 1990. – № 10. – С. 76–79.
15. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990501 Определение напряжённо-деформированного состояния элементов арматурного каната К-7 в упругой стадии работы стали / В.А. Мусихин. – М.: РОСПАТЕНТ, 1999.
16. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряжённом состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – Киев: Наукова думка, 1969. – 212 с.